

Bilanzierung von Schadstoffausträgen im Untergrund

A. Schönberg & H. Raupenstrauch
*Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für
Thermoprozesstechnik, Leoben, Österreich*

D. Adam & R. Markiewicz
Geotechnik Adam, Wien, Österreich

M. Zorzi, J. Czeziel & M. Haslehner
BALSA GmbH, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Der Schadstofftransport im Untergrund ist ein sehr komplexer Vorgang und wird von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Mit Hilfe von vereinfachten äquivalenten Modellen sollen solche komplexe Vorgänge, wie z.B. der Schadstofftransport, beschrieben werden. Unter einem Äquivalenz-Modell ist ein Modell mit einem vereinfachten Ansatz zu verstehen, welcher nur wesentliche Aspekte der Vorgänge betrachtet, diese abstrakt beschreibt und trotzdem realistische Ergebnisse liefert. Mittels einer abstrahierten Darstellung der Prozesse soll die Annahme von Randbedingungen ermöglicht werden, die zu einer einfachen Lösung des Problems führen. Als Resultat lässt sich der komplexe Vorgang damit qualitativ beschreiben und die Ergebnisse sollen trotz der vereinfachten Annahmen realitätsnahe Werte liefern. Eine Aussage über die tatsächlich ablaufenden Prozesse kann hier jedoch nicht getroffen werden, da gerade diese Vorgänge äquivalent beschrieben werden. Basierend auf den zugrundeliegenden physikalischen und chemischen Vorgängen wird für einen jeweiligen Fall ein Äquivalenz-Modell erstellt, und der Schadstofftransport damit beschrieben.

1 EINLEITUNG

Es wird versucht, mittels dieser äquivalenten Rechenmodelle aussagekräftige Prognosen über die Ausbreitung von Schadstofffrachten durch unterschiedliche im Boden ablaufende Prozesse zu erhalten. Ziel dabei ist, durch geeignete Abstrahierung der tatsächlich ablaufenden Prozesse im Modellgebiet die Anwendung analytischer Lösungen zu ermöglichen. Diese haben nämlich den Vorteil exakter mathematischer Lösungen, wodurch schnelle Ergebnisse erzielbar sind. Eine umfangreiche Variation diverser Parameter des abzubildenden Modellgebietes (Stoff-/Bodenkennwerte chemischer und physikalischer Natur) ist im Rahmen von quasi Sensitivitätsanalysen auf diese Weise effizient durchführbar. Voraussetzung für die Brauchbarkeit solcher methodischen Ansätze ist jedoch, dass die erforderliche Annahme vereinfachter geometrischer Randbedingungen und homogener Verhältnisse im Modellgebiet - welche Voraussetzung für analytische Lösungsansätze sind - eine brauchbare Beschreibung der tatsächlichen Vorgänge im Betrachtungsraum liefern können.

Die vorgestellten methodischen Ansätze sollen letztendlich für die Praxis taugliche Planungsinstrumente zur Prognose und Auslegung diverser Sanierungsmaßnahmen betreffend der Reduktion bzw. Entfernung von Schadstoffen aus dem Untergrund darstellen. Hier werden zwei Modelle vorgestellt, welche sich grundlegend in den Wirkungsweisen des Schadstofftransports unterscheiden. Einerseits kann, mittels eines theoretischen Ansatzes, der Schadstoffaustrag aus einer Deponie in das Grundwasser begründet werden. Aufgrund der vorherrschenden Verhältnisse wird ausschließlich der Transport von Schadstoffen aus dem Deponiekörper in das Grundwasser infolge diffusiver Transportprozesse behandelt. Mittels eines vereinfachten äquivalenten Modells wird die Beeinträchtigung des Grundwassers abhängig vom Grundwasserstand beschrieben. Um den diffusiven Stofftransport durch mehrere Schichten unterschiedlicher Eigenschaften beschreiben zu können, wird ein Schichtenmodell verwendet. Dabei werden geometrisch einfache Randbedingungen angenommen und die Beschreibung des diffusiven Transportes eindimensional angesetzt. Die Ergebnisse aus den Rechnungen wurden den Messdaten gegenübergestellt und zeigen eine sehr gute Übereinstimmung im Verhalten des Schadstoffaus-

trags. Andererseits erfolgt für einen anderen Anwendungsfall die Bilanzierung einer thermisch hydraulischen In-Situ-Maßnahme. Der Grundgedanke einer thermisch-hydraulischen Sanierung ist es, die Schadstoffe aus der Bodenmatrix zu lösen und mittels dem abgesaugten Wasser bzw. der Bodenluft zu entfernen. Um diesen Vorgang vereinfacht zu beschreiben und Eckdaten für eine Auslegung zu ermitteln, wird mittels eines Äquivalenz-Modells ein Rechenansatz vorgeschlagen. Als Äquivalenz-Modell wird hier eine Anordnung von Stromröhren gewählt. Innerhalb dieser Stromröhren kann der Stofftransport des Schadstoffes durch ein-dimensionale Transportprozesse beschrieben werden. In diesem Fall spielen diffusive Prozesse eine untergeordnete Rolle und es dominiert der advective Transport der Schadstoffphase. Weiters treten Lösungsvorgänge auf, welche abhängig von der Art der Schadstoffe Einfluss auf den Schadstofftransport nehmen können. Das Darstellen der Einflüsse von Art und Lage der Schadstoffe im Boden ist hinsichtlich der Anordnung von Infiltrations- und Entnahmebrunnen ausgesprochen hilfreich. Letztlich kann auch der aufzuwendende Zeitbedarf für die In-Situ-Maßnahme ermittelt werden. Da es sich um einen thermisch beeinflussten Prozess handelt, sind alle Vorgänge auch temperaturabhängig. Die Kenntnis über den Einfluss der Temperatur auf die erforderliche Sanierungszeit stellt einen wesentlichen Beitrag zur Optimierung der Maßnahme dar.

2 SCHADSTOFFAUSTRAG AUS DEPONIE

Gegenstand der Untersuchungen ist eine Deponie, in welcher neben organisch belasteten Abfällen große Mengen an anorganischen, mineralischen Abfällen mit hohen löslichen Schadstofffrachten eingelagert sind. Größtenteils lagern diese, im Wesentlichen feinkörnigen Materialien, auf Schichten von organischen, mineralischen und sonstigen Abfällen. Ein Ansatz mittels eines diffusiven Transportes durch diese Schichten sollte den Austrag gelöster Inhaltsstoffe in das Grundwasser beschreiben.

2.1 Schichtenmodell

Zur Beschreibung des diffusiven Stofftransportes durch mehrere Schichten unterschiedlicher Eigenschaften (Porosität, Wassergehalt), wird ein Schichtenmodell (analog Wärmeleitung) verwendet. Es werden drei Schichten innerhalb der Deponie ausgewählt, welche sich hinsichtlich relevanter Parameter unterscheiden. Da diese Schichten nicht nur flächenmäßig sondern auch in der Tiefe aufgeteilt sind, erfolgt eine Unterteilung der Deponiefläche in drei Ebenen unterschiedlicher Tiefe. Diese Ebenen sind aus den jeweiligen Anteilen der drei Schichten aufgebaut. Der Gesamtaustrag an Schadstoff ergibt sich somit als Summe der Austräge aus den Ebenen. Besonders gilt es darauf zu achten, dass keinesfalls ein direkter Kontakt des anorganischen Abfalls mit dem Grundwasser zustande kommt.

2.2 Ergebnisse der Rechnung

Bei einem veränderlichen Grundwasserstand ergeben sich für jede der drei Ebenen jeweilige Stoffströme. Den anteilmäßig größten Beitrag liefert bei niedrigen Grundwasserständen die größte Fläche. Ab einem bestimmten Grundwasserstand jedoch erhöht sich der Stoffstrom in der kleinsten und am tiefsten gelegenen Fläche sehr stark. Um dieses Verhalten des Schadstoffausstrags besser zu verdeutlichen, wird die Darstellung eines flächenunabhängigen Stoffstroms gewählt. Deutlich erkennbar ist der starke Einfluss der Höhe des Grundwasserspiegels. Bei Grundwasserständen im Bereich unter einer bestimmten Höhe zeichnet sich kein relevanter Unterschied des Austrags in den verschiedenen Ebenen ab. Steigt jedoch das Grundwasser auf einen kritischen Wert (relativer Grundwasserspiegel = 0) wird die unterste Fläche der Deponie eingestaut. Der Wassergehalt der Deponiesohle ist hier größer als im ungesättigten Untergrund. Der Diffusionsstrom wird nun nicht mehr durch den Wassergehalt im ungesättigten Kies limitiert, sondern vielmehr durch den Wassergehalt in den anorganischen Abfällen selbst bestimmt.

Es erfolgte eine Berechnung für die Grundwasserstände über einen beobachteten Zeitraum für welchen auch Messdaten aus dem Abstrombereich der Deponie vorhanden sind. In Abb. 1 sind die berechneten Abstrom-Konzentrationen den Messdaten einer Sonde im Abstrombereich gegenübergestellt. Gut sichtbar sind die zeitlich versetzten Auswirkungen der Grundwasser-

schwankungen, welche sich aus der Entfernung der Sonde und der Grundwasserströmung ergeben. Der Schadstoffaustrag aus der Deponie bedingt durch diffusive Transportprozesse kann somit plausibel dargestellt werden.

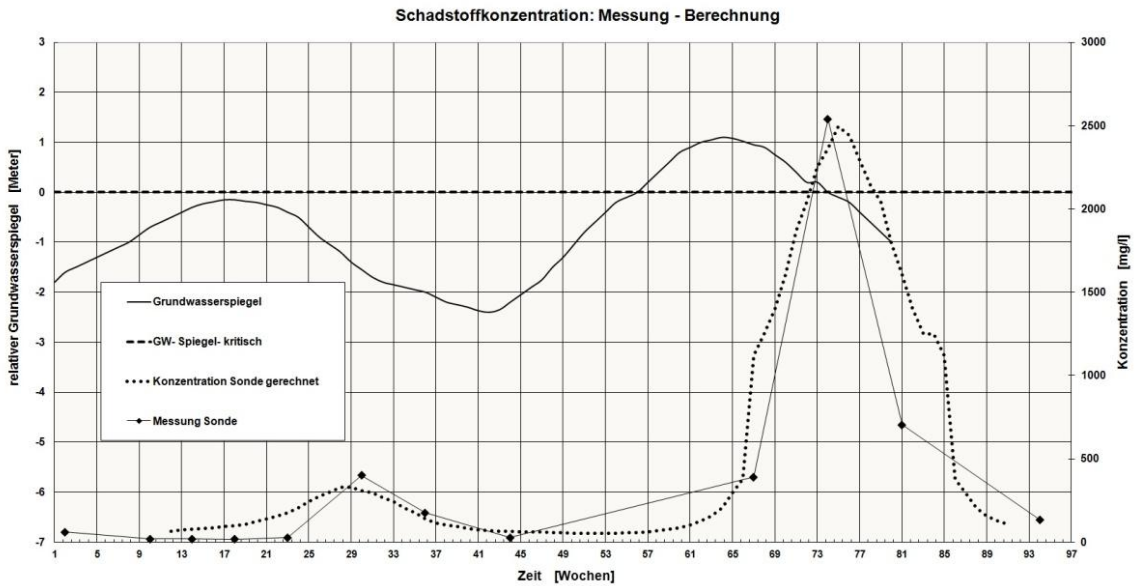


Abb. 1: Gegenüberstellung der Berechnung und der Messdaten

3 THERMISCH-HYDRAULISCHE IN-SITU-MASSNAHME

Das beschriebene Modell wird derzeit im Rahmen eines Versuchsfeldes angewandt. Bei diesem Versuchsfeld ist der gesättigte Bereich des Untergrundes mit Kohlenwasserstoffen (Teeröl) verunreinigt. Mit Hilfe einer thermisch-hydraulischen Sanierungsmaßnahme wird der Schadstoff mobilisiert und der Untergrund gereinigt. Die Beschreibung dieses Vorganges erfolgt mittels einer Kombination verschiedener Modellannahmen. Grundlage dafür ist ein numerisches Simulationsmodell, mit dessen Hilfe die Temperaturverteilung und die Strömungsverhältnisse innerhalb des Versuchsfeldes bestimmt worden sind.

3.1 Numerisches Simulationsmodell zur Bestimmung der Temperatur- und Strömungsverhältnisse

Zur Bestimmung der Temperatur- und Strömungsverhältnisse im Bereich des In-Situ-Versuchsfeldes wurde ein Simulationsmodell mit einer Länge und Breite von jeweils 100 m sowie einer Tiefe von 50 m erstellt. Die Untergrundschichtung wurde dabei auf Basis von ausgeführten Aufschlussbohrungen modelliert, sodass auch die räumliche Ausdehnung von wassertauenden Zwischenschichten berücksichtigt werden konnte. Ebenso waren die Eigenschaften des Untergrundes (Durchlässigkeit, Porenanteil, Wichte etc.) für jede Schicht festzulegen. Im Rahmen einer Parameterstudie wurde die in Abb. 2 (links) dargestellte Anordnung der Infiltrations- und Entnahmebrunnen gewählt. Wie ersichtlich, besteht das Versuchsfeld aus insgesamt sieben Infiltrationsbrunnen und drei Entnahmebrunnen. Die Tiefe der Brunnen beträgt rund 13 m, wobei die Filterstrecken mit einer Länge von rund 8 m knapp oberhalb eines Zwischenstauers zu liegen kommen.

Die einzelnen Brunnen sind in einem horizontalen Abstand von 3 m angeordnet, wobei sich die Entnahmebrunnen mittig zwischen zwei Infiltrationsreihen befinden. Diese Anordnung hat sich aus folgenden Gesichtspunkten ergeben:

- Der Strömungsweg zwischen Infiltrationsbrunnen und Entnahmebrunnen soll möglichst kurz sein, um die Mobilisierung von Schadstoffen zu begünstigen.
- Die abstromseitige Wärmeausbreitung (Temperaturfahne) soll möglichst kleinräumig sein.
- Der zu säubernde Bodenbereich soll mit möglichst geringem Energieaufwand auf über 50 °C gehalten werden.

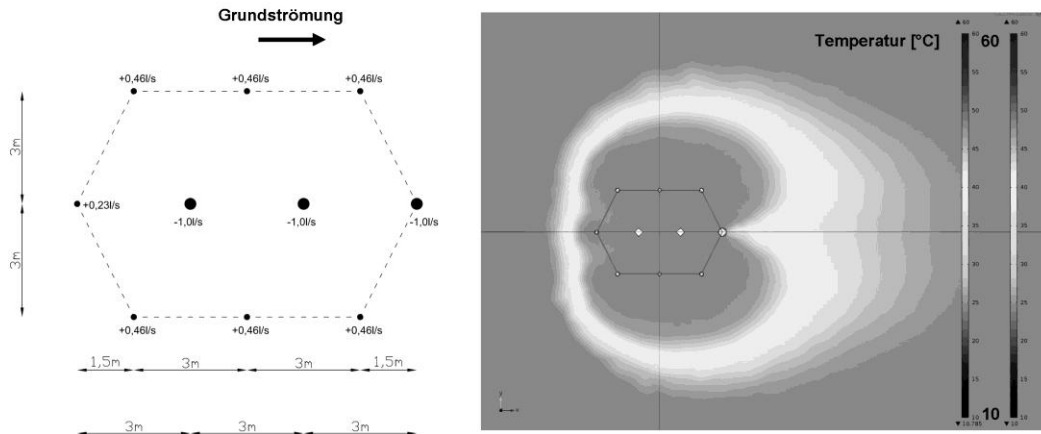


Abb. 2: Links: Anordnung der Infiltrationsbrunnen (außen liegend) und Entnahmebrunnen (innen liegend) sowie Infiltrationsrate und Entnahmerate der Einzelbrunnen. Die natürliche Grundwasserströmung verläuft von links nach rechts. Rechts: Temperaturverhältnisse nach 5 Monaten im Nahbereich des Versuchsfeldes (Horizontalschnitt in einer Tiefe von 10 m)

Abb. 2 (rechts) zeigt das Simulationsergebnis der gekoppelten thermisch-hydraulischen Berechnung nach einer Simulationsdauer von fünf Monaten. Daran lässt sich erkennen, dass die zu erreichende Solltemperatur von 50 °C im gesamten Versuchsfeld erreicht wird. Die Ausbreitung der Thermalfront mit der Grundströmung wird insbesondere durch den abstromseitig angeordneten Entnahmebrunnen erfolgreich begrenzt. Zur Analyse der Strömungsverhältnisse wurden bei jedem Infiltrationsbrunnen 80 masselose Partikel, gleichmäßig über die gesamte Filterfläche verteilt, angesetzt, die sich in weitere Folge mit der Strömung mitbewegen. Anhand der Strömungswege ist erkennbar, dass innerhalb des Versuchsfeldes der bevorzugte Strömungsweg direkt vom Infiltrationsbrunnen zum nächstgelegenen Entnahmebrunnen verläuft. Dies ist ein erwünschter Effekt, um eine möglichst hohe Schadstoffmobilisierung zu erwirken. Weiters ist auch erkennbar, dass sich einzelne Stromfäden vom Versuchsfeld weg bewegen. Diese werden in weiterer Folge von der Grundströmung, die außerhalb des Versuchsfeldes wirkt, erfasst und bewegen sich zunächst damit mit. Der Großteil dieser Stromfäden wird schließlich wieder vom letzten (abstromseitig situiert) Entnahmebrunnen erfasst, sodass eine weitreichende Temperatur- und Schadstoffmobilisierung unterbunden wird. Aufbauend auf diesen Berechnungen wurde schließlich für jeden einzelnen Stromfaden eine Auswertung hinsichtlich dessen räumlichen Weg und dessen Geschwindigkeit durchgeführt. Diese Daten bildeten schließlich die Grundlage für das weiterführende Transportmodell.

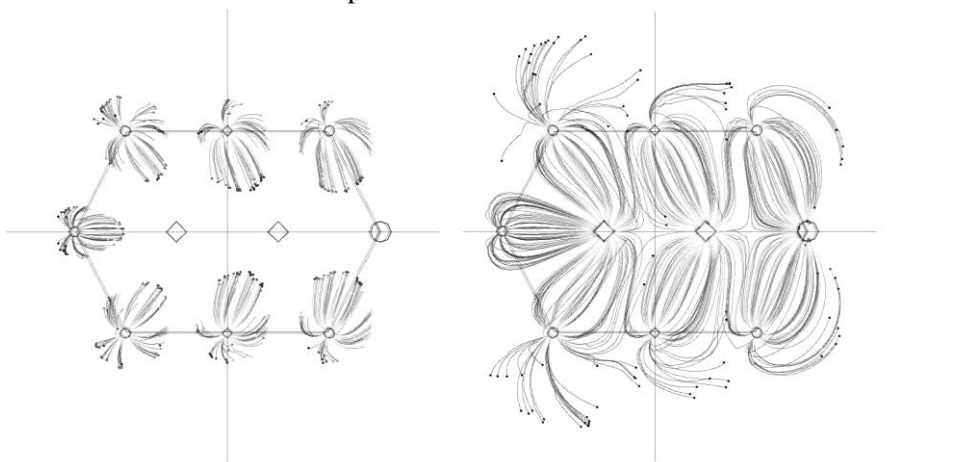


Abb. 3: Versuchsfeld im Grundriss mit Strömungsfäden von jeweils 80 masselosen Partikeln pro Infiltrationsbrunnen (links: nach einem Tag; rechts: nach acht Tagen)

3.2 Äquivalentes Strömungsmodell

Die Strömung im Versuchsfeld kann mittels der Potentialtheorie beschrieben werden. Dies erlaubt eine Zuweisung von Stromröhren, welche als ein-dimensionale Transportwege angesehen werden können. Die Geometrie dieser Stromröhren wird durch die Anordnung der Brunnen bestimmt. In Summe geben alle Stromröhren gemeinsam das Strömungsbild wieder. Weiters muss jeder Stromröhre nun eine entsprechende Geschwindigkeit zugewiesen werden. Mittels der Ergebnisse aus der Simulationsrechnung (vgl. Kap. 3.1) lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Länge einer Stromröhre und ihrer mittleren Strömungsgeschwindigkeit ermitteln. Da die Geschwindigkeit in der Stromröhre aufgrund des veränderlichen Querschnitts nicht konstant ist, werden den einzelnen Bereichen der Stromröhren jeweilige Längen zugewiesen. So ergibt sich eine äquivalente Stromröhre mit konstantem Querschnitt und Geschwindigkeit, aber geänderten Längen (siehe Abb. 4).

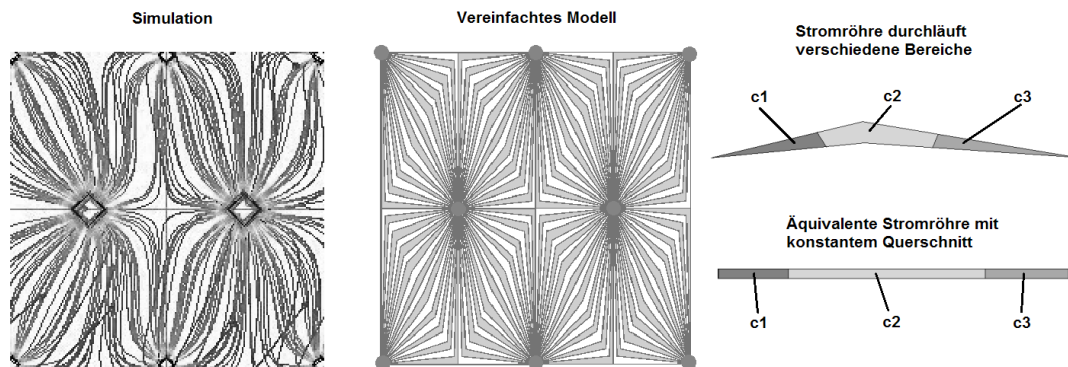


Abb. 4: Bildung des äquivalenten Strömungsmodells

3.3 Transportmodell

Es werden Partikel mit einem mittleren Durchmesser angenommen, welche während eines advektiv dispersen Transports in Lösung gehen. Der Stofftransport durch Lösung an umströmten Partikeln kann mittels eines Potenzansatzes beschrieben werden (Sherwood-Beziehung). Dadurch kann der in Lösung übergehende flächenspezifische Schadstoffstrom ermittelt werden. Einer vorhandenen Schadstoffkonzentration wird eine zugehörige Stoffaustauschfläche zugeordnet, welche sich aus einer zu wählenden Partikelgröße ergibt. Somit ist es möglich die in Lösung gehende Schadstoffmenge zu errechnen. Der Verlauf dieser Konzentration ist lediglich von den Ausgangsbedingungen abhängig. Gleichzeitig werden die Partikel selbst auch in Strömungsrichtung transportiert. Dieser dispers- advective Transport geschieht mit einer sehr viel kleineren Geschwindigkeit als die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers und ist stark temperaturabhängig. Der advektiv disperse Transport wird ausgehend von der ein-dimensionalen Stofftransport-Gleichung definiert.

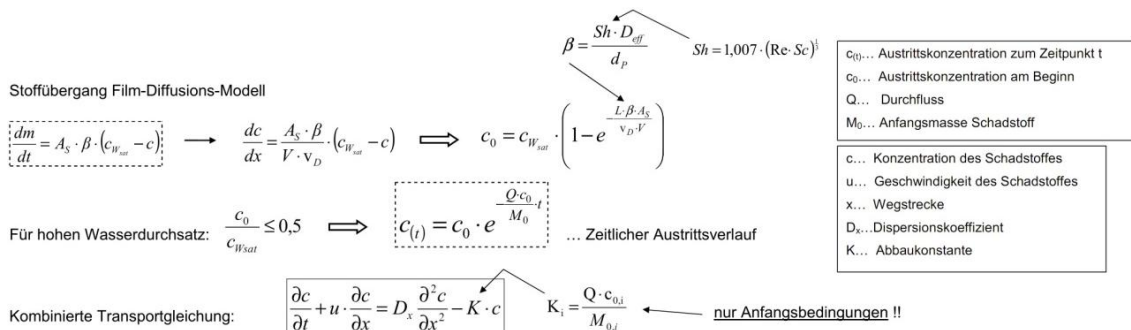


Abb. 5: Bildung der kombinierten Transportgleichung

Der Ansatz zum Vereinen der beiden Mechanismen besteht in der Annahme, dass die Lösung von schlechtlöslichen Stoffen als ein Abbauprozess erster Ordnung angesehen werden kann. Die Konzentration des dispers advektiv bewegten Schadstoffs wird somit durch den in Lösung gehenden Anteil vermindert (siehe Abb. 5). Zur analytischen Lösung dieser Transport-Gleichung bedarf es nun eines äquivalenten Modells, welches anzunehmende Randbedingungen ermöglicht. Hierfür wird ein rasterförmiges höhengeschichtetes Kontaminations-Modell mit dem äquivalenten Strömungsmodell gekoppelt. Die Stromröhren durchlaufen auf ihrem Weg jeweils verschiedene Kontaminationsbereiche. Abhängig von ihrer Position ergeben sich verschiedene Weglängen, Geschwindigkeiten und auch zugeordnete Längen der Kontaminationsbereiche. Es ist somit möglich den zeitlichen Verlauf der Konzentration an jedem Punkt entlang einer Stromröhre zu ermitteln. Da für eine Bilanzierung die ausgetragene Schadstoffmenge interessant ist, wird als Längenkoordinate der Austritt jeder Stromröhre herangezogen. Dadurch ergeben sich die zeitlich veränderlichen Austritts-Konzentrationen von Schadstoffen in den Entnahmebrunnen. Abb. 6 zeigt Austrittsverläufe zweier Brunnen (Brunnen 1 mit zentralen und Brunnen 2 mit entfernt liegenden Kontaminationen). Aus diesen Verläufen errechnen sich, über die Zeit aufsummiert, die advektiv dispers ausgetragenen Schadstoffmengen. Die durch Lösung ausgetragenen Schadstoffmengen erhält man als Differenz aus einer Referenz-Rechnung (ohne Löslichkeit).

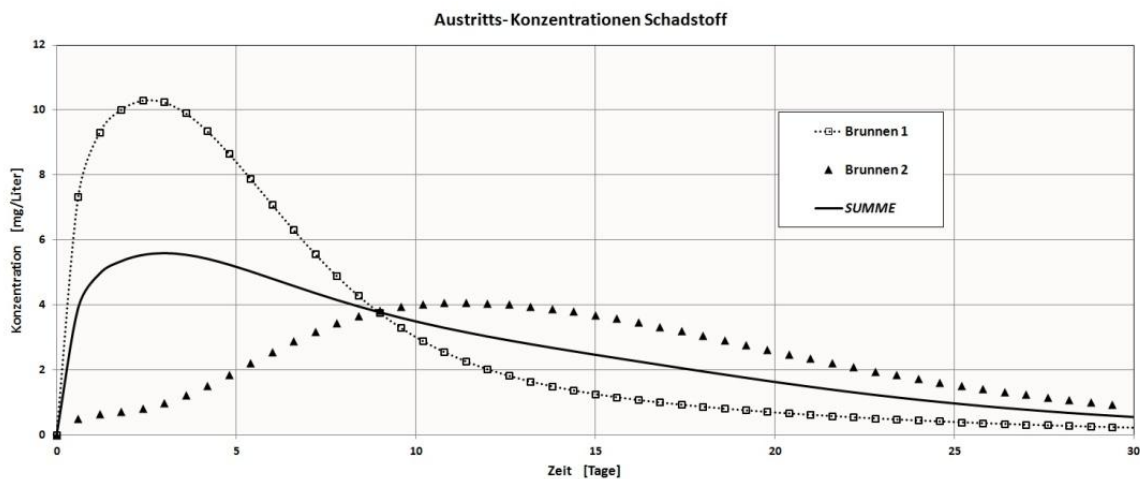


Abb. 6: Unterschiedliche Austrittskonzentrationsverläufe

4 SCHLUSSFOLGERUNG

Das Schichtenmodell kann als Entscheidungshilfe für die Auswahl einer geeigneten Sanierungsmaßnahme der Deponie dienen. Das äquivalente Strömungs- und Transportmodell für die thermisch-hydraulische In-Situ-Maßnahme wird anhand eines Pilotversuchs evaluiert und kann folgend für die Auslegung einer großflächigen Sanierung herangezogen werden.

LITERATUR

Mohrlock, U. (2009) *Bilanzmodelle in der Grundwasserhydraulik*. Karlsruhe, Germany: Universitätsverlag Karlsruhe.